

# BREVET D'INVENTION

CERTIFICAT D'UTILITÉ - CERTIFICAT D'ADDITION

## COPIE OFFICIELLE

Le Directeur général de l'Institut national de la propriété industrielle certifie que le document ci-annexé est la copie certifiée conforme d'une demande de titre de propriété industrielle déposée à l'Institut.

Fait à Paris, le 22 JAN. 2004

Pour le Directeur général de l'Institut  
national de la propriété industrielle  
Le Chef du Département des brevets

Martine PLANCHE

DOCUMENT DE PRIORITÉ

PRÉSENTÉ OU TRANSMIS  
CONFORMÉMENT À LA  
RÈGLE 17.1.a) OU b)

BEST AVAILABLE COPY

INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

SIEGE  
26 bis, rue de Saint Petersburg  
75800 PARIS cedex 08  
Téléphone : 33 (0)1 53 04 53 04  
Télécopie : 33 (0)1 53 04 45 23  
www.inpi.fr



INSTITUT  
NATIONAL DE  
LA PROPRIÉTÉ  
INDUSTRIELLE

26 bis, rue de Saint Pétersbourg

75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

# BREVET D'INVENTION CERTIFICAT D'UTILITÉ

Code de la propriété Intellectuelle - Livre VI



N° 11354\*02

## REQUÊTE EN DÉLIVRANCE

page 1/2



Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 540 @ W / 010801

<b>REMISE DES PIÈCES</b> DATE <b>16 JAN 2003</b> LIEU <b>75 INPI PARIS</b> N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI DATE DE DÉPÔT ATTRIBUÉE PAR L'INPI <b>16 JAN. 2003</b> <b>Vos références pour ce dossier</b> (facultatif) JC/CLN		<b>1 NOM ET ADRESSE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE</b> À QUI LA CORRESPONDANCE DOIT ÊTRE ADRESSÉE ▪ INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE 1 et 4 avenue de Bois Préau 92852 Rueil-Malmaison cedex ▪	
<b>Confirmation d'un dépôt par télécopie</b>		<input type="checkbox"/> N° attribué par l'INPI à la télécopie	
<b>2 NATURE DE LA DEMANDE</b>		<b>Cochez l'une des 4 cases suivantes</b>	
Demande de brevet		<input checked="" type="checkbox"/>	
Demande de certificat d'utilité		<input type="checkbox"/>	
Demande divisionnaire		<input type="checkbox"/>	
Demande de brevet initiale		N°	Date
ou demande de certificat d'utilité initiale		N°	Date
Transformation d'une demande de brevet européen		<input type="checkbox"/>	Date
Demande de brevet initiale		N°	Date
<b>3 TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)</b> METHODE POUR DETERMINER DES ZONES D'UN MILIEU STRATIFIE OU L'INTERFACE ENTRE UN FLUIDE EN PLACE DANS LE MILIEU ET UN FLUIDE DE BALAYAGE, SE DEPLACE DE FAÇON STATIONNAIRE			
<b>4 DÉCLARATION DE PRIORITÉ</b> <b>OU REQUÊTE DU BÉNÉFICE DE</b> <b>LA DATE DE DÉPÔT D'UNE</b> <b>DEMANDE ANTÉRIEURE FRANÇAISE</b>		Pays ou organisation Date N° Pays ou organisation Date N° Pays ou organisation Date N° <input type="checkbox"/> S'il y a d'autres priorités, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	
<b>5 DEMANDEUR (Cochez l'une des 2 cases)</b>		<input checked="" type="checkbox"/> Personne morale <input type="checkbox"/> Personne physique	
Nom ou dénomination sociale		INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE	
Prénoms			
Forme juridique		Organisme Professionnel	
N° SIREN			
Code APE-NAF			
Domicile ou siège		1 et 4 avenue de Bois Préau	
Rue			
Code postal et ville		92852 Rueil-Malmaison cedex	
Pays		France	
Nationalité		Française	
N° de téléphone (facultatif)		01 47 52 60 00 N° de télécopie (facultatif) 01 47 52 70 03	
Adresse électronique (facultatif)			
		<input type="checkbox"/> S'il y a plus d'un demandeur, cochez la case et utilisez l'imprimé «Suite»	

Remplir impérativement la 2<sup>ème</sup> page

REMISE DES PIÈCES DATE <b>16 JAN 2003</b> LIEU <b>75 INPI PARIS</b> N° D'ENREGISTREMENT <b>0300430</b> NATIONAL ATTRIBUÉ PAR L'INPI		Réservé à l'INPI	DB 540 @ W / 010801
<b>Vos références pour ce dossier :</b> <i>(facultatif)</i>		JC/CLN	
<b>6 MANDATAIRE</b> <i>(s'il y a lieu)</i>			
Nom		ELMALEH	
Prénom		Alfred	
Cabinet ou Société		INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE	
N° de pouvoir permanent et/ou de lien contractuel			
Adresse	Rue	1 et 4 avenue de Bois Préau	
	Code postal et ville	92 18 15 12   Rueil-Malmaison cedex	
	Pays	France	
N° de téléphone <i>(facultatif)</i>		01 47 52 60 00	
N° de télécopie <i>(facultatif)</i>		01 47 52 70 03	
Adresse électronique <i>(facultatif)</i>			
<b>7 INVENTEUR (S)</b>		Les inventeurs sont nécessairement des personnes physiques	
Les demandeurs et les inventeurs sont les mêmes personnes		<input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non : Dans ce cas remplir le formulaire de Désignation d'inventeur(s)	
<b>8 RAPPORT DE RECHERCHE</b>		Uniquement pour une demande de brevet (y compris division et transformation)	
Établissement immédiat ou établissement différé		<input checked="" type="checkbox"/> Établissement immédiat <input type="checkbox"/> Établissement différé	
Paiement échelonné de la redevance <i>(en deux versements)</i>		Uniquement pour les personnes physiques effectuant elles-mêmes leur propre dépôt <input type="checkbox"/> Oui <input checked="" type="checkbox"/> Non	
<b>9 RÉDUCTION DU TAUX DES REDEVANCES</b>		Uniquement pour les personnes physiques <input type="checkbox"/> Requête pour la première fois pour cette invention <i>(joindre un avis de non-imposition)</i> <input type="checkbox"/> Obtenue antérieurement à ce dépôt pour cette invention <i>(joindre une copie de la décision d'admission à l'assistance gratuite ou indiquer sa référence)</i> : AG [ ] [ ] [ ] [ ] [ ]	
Si vous avez utilisé l'imprimé «Suite», indiquez le nombre de pages jointes			
<b>10 SIGNATURE DU DEMANDEUR OU DU MANDATAIRE</b> (Nom et qualité du signataire) Alfred ELMALEH, Directeur - Propriété Industrielle		VISA DE LA PRÉFECTURE OU DE L'INPI N° 11 C. TRAN C. TRAN	

5

10

La présente invention concerne une méthode pour déterminer des zones d'un milieu poreux stratifié dans lesquelles le front ou interface entre des fluides en place et des fluides de balayage se déplace de façon stationnaire, c'est-à-dire sans déformation et à vitesse constante.

15

La méthode trouve des applications notamment quand on a à balayer par des fluides injectés (de l'eau par exemple) un gisement d'hydrocarbures stratifié. Cette détermination permet d'obtenir très rapidement les zones pouvant être agrégées et constituer des unités hydrodynamiques lors de la mise à l'échelle d'un modèle de réservoir.

#### Etat de la technique

20

La simulation des écoulements diphasiques en milieu poreux hétérogène peut requérir d'importantes ressources informatiques, en particulier lorsque le modèle numérique du milieu considéré est fortement détaillé. C'est le cas notamment en ingénierie de réservoirs, dans le domaine pétrolier. Afin de pouvoir procéder à la simulation d'écoulements avec des moyens raisonnables, il faut utiliser une description réduite du réservoir. Une technique consiste à agréger les mailles du modèle numérique de façon à obtenir un maillage plus grossier, composé de mailles aux valeurs effectives moyennes. Cette technique, dite des pseudos-fonctions, a initialement été proposée pour des réservoirs stratifiés de façon à agréger les mailles dans la direction verticale par

25

- Coats, K.H., Nielsen, R.L. and Terhune, M.H. "Simulation of three-dimensional, two-phase flow in oil and gas reservoirs." SPE 1961, 1967

30

Cette méthode, reprise et étendue par de nombreux auteurs, repose sur des hypothèses d'équilibre vertical capillaire ou d'équilibre gravitaire où les forces capillaires ou gravitaires sont prédominantes devant les effets dus à la viscosité, et la distribution des saturations dans le réservoir peut être connue sans recourir à une simulation sur le maillage précis (simulation

fine). On peut en tirer facilement des valeurs moyennes suivant la direction verticale. Une seule couche aux valeurs moyennes peut finalement suffire à décrire l'évolution des saturations dans le réservoir.

Une autre méthode conduisant à obtenir des valeurs moyennes est proposée par :

- 5 - Hearn, C.L. "*Simulation of stratified waterflooding by pseudo-relative permeability curve.*" Journal of Petroleum Technology, pages 805-813, July 1971.

Elle repose sur l'hypothèse d'équilibre vertical dû aux effets visqueux. Dans ce cas, les rééquilibrages visqueux dans le réservoirs sont très rapides par rapport aux variations de saturation, de telle sorte que des valeurs moyennes peuvent toujours être calculées sans  
10 recourir à la simulation fine, car les fluides se propagent à vitesse constante dans chaque couche. La méthode de Hearn, ultérieurement étendue par, entre autres par :

- Simon, A.D. and Koederitz, L.F. "*An improved method for the determination of pseudo-relative permeability data for stratified systems.*" SPE 10975, 1982,

se base sur un calcul itératif conduisant à ordonner les couches du réservoir en fonction de la  
15 vitesse de propagation des fluides dans celles-ci. On peut montrer que ce calcul itératif peut ne pas converger. On est alors en présence d'un front stationnaire dans au moins deux couches du réservoir. Les auteurs proposent alors de ne prendre qu'une seule couche aux propriétés moyennes pour ces zones particulières. Une étude théorique de l'équilibre vertical et de ses implications peut être trouvée chez :

- 20 - Yortsos, Y.C. "*Analytical studies for processes at vertical equilibrium.*" SPE 26022, 1992.

Lorsque la capillarité ou la gravité ne peuvent être considérées comme prédominantes sur les effets visqueux, mais que l'équilibre vertical visqueux ne peut se mettre en place, les méthodes proposées jusqu'à présent ne peuvent se passer d'une simulation fine sur tout ou  
25 partie du réservoir pour calculer les propriétés moyennes pouvant être affectées aux blocs grossiers. On parle alors de pseudo fonctions dynamiques. Celles-ci furent introduites notamment par :

- Kyte, J.R. and Berry, D.W. "*New pseudo functions to control numerical dispersion.*" SPE 5105, 1975.

Ces méthodes dynamiques posent toutefois de nombreux problèmes théoriques et pratiques. Des revues de ces méthodes et des problèmes associés peuvent être trouvées dans les publications suivantes :

- Archer, R. "*Pseudo function generation*", Master of Science thesis, Departement of Petroleum Engineering of Stanford University, 1996.
- Ahmadi, A. "*Utilisation des propriétés équivalentes dans les modèles de réservoir : cas des écoulements diphasiques incompressibles*." Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux I, 1992 ;
- Barker J.W. and Thibéau S. "*A critical review of the use of pseudo relative permeabilities for upscaling*". SPE 35491, 1996.

Les méthodes dynamiques ont en général recours à une agrégation systématique et uniforme des mailles. Afin de prendre en compte les influences locales des hétérogénéités sur l'écoulement, des méthodes d'agrégation non-uniformes ont été proposées notamment par :

- Darman, N.H. and Durlofsky, L.J. "*Upscaling immiscible gas displacements: Quantitative Use of Fine Grid Flow Data in Grid Coarsening Schemes*." SPE 59452, 2000.

Ces méthodes ont l'avantage de n'agréger que des zones préférentielles et laissent en état initial les parties du réservoir à caractères hydrodynamiques plus complexes. Elles ne peuvent cependant s'affranchir d'une simulation fine.

Des méthodes permettant d'agréger de façon non uniformes les strates d'un réservoir, sans avoir recours à une simulation détaillée, ont été proposées. On peut citer des méthodes entièrement statiques, comme :

- Li, D. and Beckner, B. "*Optimal uplayering for scaleup of multimillion-cell geologic models*", SPE 62927, 2000

ou basées sur les résultats d'une simulation d'écoulement monophasique (qui est beaucoup rapide qu'une simulation d'écoulement diphasique), comme :

- Stern, D. and Dawson, A.G. "*A technique for generating reservoir simulation grids to preserve geologic heterogeneity*", SPE 51942, 1999.

De telles méthodes, par définition, ne prennent donc pas en compte les effets dynamiques et visqueux des écoulements diphasiques.

L'évolution du front dans le réservoir au cours de l'écoulement est considérablement influencée par le couplage visqueux entre le champ de pression et le champ de saturation. En particulier, lorsque le fluide injecté est moins visqueux et par conséquent plus mobile au niveau du front que le fluide en place, les instabilités visqueuses favoriseront toujours l'écoulement des fluides dans les couches les plus perméables. Le temps de percée au travers de celles-ci est beaucoup plus rapide que dans le reste du réservoir. Au contraire, si le fluide injecté est moins mobile, le couplage visqueux peut le ralentir dans les couches initialement plus rapides, compensant ainsi les différences de perméabilité dues à la stratification. Un front stationnaire apparaît alors.

Si, dans au moins une partie du réservoir, il existe un tel front stationnaire, tout se passe comme si l'écoulement n'y voyait qu'une seule couche au sens hydrodynamique. On peut donc raisonnablement penser qu'une seule couche aux propriétés moyennes dans cette zone suffit à la modélisation lors de la simulation numérique de l'écoulement. Ceci est d'importance capitale lorsque l'on passe du modèle géologique de réservoir avec toutes les couches, au modèle de simulation, pour lequel seules les zones les plus influentes sur l'écoulement suffisent à la description.

Deux problèmes se posent alors. Connaissant la viscosité du fluide injecté, il faut pouvoir déterminer *a priori* l'existence et la localisation de zones où l'écoulement est stationnaire, sans recourir pour autant à une simulation complète d'écoulement sur le modèle détaillé. Il faut également être en mesure avec la même contrainte, de choisir la viscosité du fluide injecté de telle sorte qu'un maximum de couches aient un comportement stationnaire.

La méthode que nous proposons permet de reconnaître les zones d'un réservoir stratifié se comportant comme une seule couche au sens hydrodynamique sans recourir à une simulation fine et sans invoquer les hypothèses d'équilibre vertical. Elle facilite le choix des zones à agréger dans les réservoirs stratifiés. Elle permet donc de prendre en compte les effets dynamiques et visqueux tout en permettant une détermination des couches grossières très rapide par rapport aux anciennes solutions.

### La méthode selon l'invention

La méthode selon l'invention permet de déterminer dans un milieu stratifié dont les propriétés physiques sont connues ou estimées, au moins une zone où une interface entre un fluide en place dans le milieu et un fluide de balayage, de viscosités et densités différentes connues,

injectés dans le milieu, se déplace de façon stationnaire, dans le but de simplifier la construction d'un modèle de simulation des écoulements dans le milieu. Elle comporte essentiellement les étapes suivantes :

- on considère une forme d'interface a priori en supposant que les déplacements de fluides en tous ses points sont stationnaires ;
- on détermine le champ de pression de part et d'autre de l'interface a priori ;
- on modifie itérativement la forme de l'interface jusqu'à obtenir que les pressions de part et d'autre d'au moins une partie de l'interface s'égalisent en tous points de cette partie ; et
- on attribue des propriétés hydrodynamiques moyennes uniformément à chaque zone du milieu délimitée par chaque partie d'interface, quand la dite égalisation est atteinte.

Suivant un mode de mise en œuvre, quand on ne peut obtenir une égalisation des pressions de part et d'autre de l'interface tout le long de celle-ci, on segmente l'interface en plusieurs parties et on modifie itérativement et séparément la forme de ces différentes parties, jusqu'à obtenir une égalisation des pressions de part et d'autre de chacune d'elles, l'étendue de chaque partie d'interface, quand la dite égalisation est atteinte, délimitant une zone favorable à laquelle on attribue uniformément des propriétés hydrodynamiques moyennes.

Suivant un exemple de mise en œuvre, on détermine la forme d'au moins une zone du milieu délimitée par une interface à déplacement stationnaire, qui correspond à des valeurs différentes de la viscosité des fluides de balayage, et on choisit la viscosité pour laquelle on optimise les déplacements stationnaires dans le dit milieu.

### **Présentation succincte des figures**

Les caractéristiques et avantages de la méthode selon l'invention, apparaîtront plus clairement à la lecture de la description ci-après d'un exemple non limitatif de mise en œuvre, en se référant aux dessins annexés où :

- la figure 1 montre une boucle de détermination itérative de l'existence et de la forme d'un front stationnaire pour un écoulement diphasique de rapport de viscosités connu dans un milieu stratifié donné ;

- la figure 2 montre une boucle de construction itérative de l'évolution des couches hydrodynamiques en fonction du rapport des viscosités, pour des écoulements diphasiques dans un milieu stratifié donné ;
- la figure 3 montre un exemple de réservoir stratifié incliné par rapport à la verticale. Cette figure a pour but d'explicitier les notations employées dans la description de la méthode ;
- la figure 4 montre la valeur des perméabilités absolues en fonction de la profondeur, employées dans l'exemple synthétique de réservoir illustrant la méthode de façon non-limitative ;
- la figure 5 montre l'évolution de l'interface au cours du processus itératif de recherche de la forme d'un front stationnaire, sur l'exemple décrit par la figure 4 ;
- la figure 6 montre l'évolution de la solution stationnaire en fonction du rapport des viscosités employées, sur l'exemple décrit par la figure 4 ; et
- la figure 7 montre l'évolution du nombre de couches hydrodynamiques en fonction du rapport des viscosités employées, sur l'exemple décrit par la figure 4.

## 15 Description détaillée de la méthode

On considère un balayage de fluides de viscosités connues dans un milieu stratifié. Supposons qu'un front stationnaire de forme connue se développe dans le milieu considéré. Ceci impose une condition de flux au niveau de l'interface. Le flux est également connu sur les bords du réservoir (où il est en général nul), en entrée et en sortie (où il est imposé par les conditions d'injection et de récupération). Comme la pression est une variable continue, le saut de pression de part et d'autre de l'interface est nul en tout point de celle-ci.

On cherche à présent l'existence et la forme d'un front stationnaire dans le milieu. On procède de façon itérative en partant d'une forme de front a priori, en supposant que celle-ci correspond à la solution stationnaire. Comme le front est supposé stationnaire, on connaît le flux à l'interface et l'on a donc un problème de Neumann parfaitement défini à résoudre pour chacune des deux zones que sépare l'interface. Le champ de pression peut donc être résolu indépendamment dans les deux régions. On évalue alors le saut de pression de part et d'autre de l'interface, en tout point de celle-ci. Si le saut de pression est nul en tout point, on possède alors la forme correcte du front correspondant à un écoulement stationnaire. Si le saut n'est

pas nul partout, la condition de continuité des pressions n'est pas respectée et la forme de front ne correspond pas à une solution stationnaire. On doit alors déformer l'interface et recommencer le processus jusqu'à la convergence. Deux cas apparaissent alors :

- Si la convergence est atteinte, on possède alors la forme du front correspondant à une solution stationnaire de l'écoulement. Toutes les couches sont traversées par le fluide à la même vitesse, et l'ensemble du système se comporte comme une seule unité hydrodynamique. On peut donc ne considérer qu'une seule couche aux propriétés moyennes lors de la mise à l'échelle.
- Si le processus itératif ne converge pas, c'est qu'un front stationnaire ne peut pas exister sur l'ensemble du milieu. Lors de la déformation du front, il apparaît alors en général deux zones s'éloignant perpétuellement l'une de l'autre. On découpe alors le milieu en deux parties correspondants aux zones précédemment identifiées. Puis le processus de recherche d'une solution stationnaire reprend dans chacune de ces deux parties. En procédant ainsi de manière itérative, on finira par obtenir toutes les zones dans lesquelles des fronts stationnaires peuvent se développer, et qui peuvent être considérées comme des unités hydrodynamiques.

La méthode peut aussi être appliquée de façon itérative en faisant varier le rapport des viscosités des fluides considérés. On part d'un fluide injecté beaucoup plus visqueux que celui en place. On doit alors trouver rapidement une solution stationnaire sur toute l'épaisseur du milieu. Lorsque l'on diminue le rapport des viscosités entre le fluide injecté et le fluide en place, la forme du front stationnaire, si celui-ci existe, doit être modifiée. On reprend alors la méthode décrite ci-dessus pour trouver la nouvelle forme du front, en utilisant comme forme de front initiale du processus itératif, la forme finale obtenue pour le précédent rapport des mobilités. Ceci permet de converger beaucoup plus rapidement vers la solution stationnaire.

- On peut ainsi procéder de façon itérative sur le rapport des viscosités. Au fur et à mesure que l'on décroît ce rapport, le couplage visqueux ne sera plus suffisant pour compenser les contrastes de perméabilité et une solution stationnaire ne pourra plus être trouvée sur toute l'épaisseur du milieu. On découpe alors le milieu en deux portions suivant la méthode décrite ci-dessus en cas de non-convergence, et la recherche se poursuit dans les deux portions de milieu. En procédant ainsi de façon itérative sur le rapport des viscosités, on obtient le nombre de couches hydrodynamiques du milieu en fonction des viscosités considérées. Ce

résultat pourrait permettre par exemple de connaître la viscosité du fluide d'injection qui permet d'optimiser la récupération.

On considère une section verticale d'un réservoir stratifié selon une direction  $x$  inclinée par rapport à l'horizontale (figure 3). Les valeurs des perméabilités absolues sont connues dans toutes les strates. L'épaisseur du réservoir est selon la direction  $z$ . A l'extrémité amont ( $x = 0$ ) on injecte, à débit constant  $Q_0$  imposé, un fluide incompressible de viscosité  $\mu_1$  et de densité  $\rho_1$ , qui pousse de façon immiscible le fluide initialement présent dans le réservoir, incompressible et de viscosité  $\mu_2$  et de densité  $\rho_2$ . On suppose qu'il n'y a pas de pression capillaire entre les deux fluides. La récupération se fait à l'extrémité aval ( $x = L$ ). Le flux est nul à travers le toit ( $z = 0$ ) et le mur du réservoir ( $z = A$ ). On suppose également que les courbes de perméabilités relatives sont uniformes dans le réservoir et que chacune de ces deux zones est à saturation constante en fluides considérés. La zone non encore balayée est donc à saturation irréductible  $S_{ir}$  en fluide injecté et la zone balayée à saturation maximum  $S_m$  ou saturation de front  $S_f$  selon les hypothèses de l'utilisateur. Le front de saturation est arbitrairement placé au centre du réservoir, avec une forme présumée qui correspond à notre a priori sur la forme du front stationnaire. Cette forme sera par la suite modifiée jusqu'à trouver la "vraie" solution stationnaire, si celle-ci existe. On doit donc résoudre un problème aux frontières libres.

Les conditions aux limites et la condition de front stationnaire permettent de définir un problème de Neumann dans les deux zones que sépare le front :

- A l'extrémité amont : la condition d'injection impose un flux constant sur l'épaisseur du réservoir en entrée. Si le milieu est supposé suffisamment long et le profil de saturations déjà bien développé, on peut supposer que le gradient de pression en entrée du système est identique dans toutes les couches :

$$\frac{\partial p}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{\mu_1 Q_0}{\bar{K}_1} + \rho_1 g \cdot x$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} \Big|_{x=0} = \rho_1 g \cdot z$$

où  $p$  est la pression au point considéré et  $\bar{K}_1$  est la moyenne des perméabilités effectives en entrée sur toute l'épaisseur du milieu, et  $Q_0$  est le débit d'injection. Les perméabilités

effectives prennent en compte l'effet des perméabilités relatives, en fonction des saturations choisies par l'utilisateur dans les zones amont et aval.

- *A l'extrémité aval* : la condition d'incompressibilité impose que le flux sortant du système soit le même que le flux entrant. On obtient donc une condition similaire à la tranche de récupération :

$$\left. \frac{\partial p}{\partial x} \right|_{x=L} = \frac{\mu_2 Q_0}{\bar{K}_2} + \rho_2 \mathbf{g} \cdot \mathbf{x}$$

$$\left. \frac{\partial p}{\partial z} \right|_{x=L} = \rho_2 \mathbf{g} \cdot \mathbf{z}$$

où  $\bar{K}_2$  est la moyenne des perméabilités effectives en sortie sur toute l'épaisseur du milieu.

- *de part et d'autre de l'interface* : Comme le front est supposé stationnaire, il se déplace horizontalement sans déformation à la vitesse de filtration  $U_0$ , définie telle que :

$$U_0 = \frac{Q_0}{A} \mathbf{x}$$

Où  $\mathbf{x}$  est le vecteur unitaire dans la direction horizontale. Cette condition impose le flux et donc le gradient de pression de part et d'autre de l'interface :

$$K_1(z) \frac{(\rho_1 \mathbf{g} - \nabla p_1) \cdot \mathbf{n}}{\mu_1} = K_2(z) \frac{(\rho_2 \mathbf{g} - \nabla p_2) \cdot \mathbf{n}}{\mu_2} = U_0 \cdot \mathbf{n}$$

- où  $\mathbf{n}$  est le vecteur unitaire orthogonal à l'interface au point considéré,  $\nabla p_1$  est le gradient de pression à l'interface du côté amont et  $\nabla p_2$  est le gradient de pression à l'interface du côté aval.

- *Equation en pression* : L'équation en pression est donnée classiquement de part et d'autre de l'interface. Pour la zone aval :

$$\nabla \left( \frac{K_1(z)}{\mu_1} (\rho_1 \mathbf{g} - \nabla p) \right) = 0$$

Pour la zone amont :

$$\nabla \left( \frac{K_2(z)}{\mu_2} (\rho_2 \mathbf{g} - \nabla p) \right) = 0$$

Les équations en pression et les conditions aux limites permettent de définir pour chaque zone de part et d'autre du front un problème de Neumann. Le champ de pression dans chaque zone peut donc être calculé numériquement à une constante près pour chaque zone. On élimine ce problème en posant la condition supplémentaire suivante, permettant d'éliminer les constantes en recalant les pressions le long du front :

$$\int p_1(z) dz = \int p_2(z) dz = C$$

où  $p_1$  et  $p_2$  sont les pressions évaluées au front respectivement pour les zones amont et aval, et  $C$  est définie arbitrairement par l'utilisateur et peut être nulle.

Une fois la pression  $p$  calculée dans chaque région et recalée le long de l'interface, le saut de pression  $\delta p_f(z)$  à travers le front en tout point de ce dernier peut être calculé :

$$\delta p_f(z) = p_2(z) - p_1(z) - \Delta \rho (\mathbf{g} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{g} \cdot \mathbf{z})$$

Si le saut de pression est partout nul le long du front, ou du moins en deçà de la valeur critique définie par l'utilisateur, on dispose de la forme du front correspondant à un déplacement stationnaire. Sinon, il faut déformer l'interface de façon à faire diminuer les sauts de pression jusqu'à obtenir la forme stationnaire. Ceci revient alors à résoudre un problème d'optimisation, pour lequel de nombreuses méthodes sont applicables.

Ce processus de minimisation peut ne pas converger. Dans ce cas, il n'existe pas de front stationnaire sur toute l'épaisseur du milieu. La méthode décrite doit donc être reprise sur des parties plus petites du réservoir. On peut ainsi trouver des fronts stationnaires dans plusieurs zones du réservoir, qui se déplacent à des vitesses différentes.

### Exemple

On décrit ici un exemple synthétique illustrant la méthode de façon non-limitative.

On considère un réservoir stratifié avec quatre strates horizontales de perméabilités différentes, indiquées sur la figure 4. Pour simplifier au maximum, on négligera les effets de

la gravité et on considérera que les perméabilités relatives des strates sont telles que la zone non balayée est saturée en huile seule et qu'en amont de l'interface, seule l'eau est présente à saturation  $S=1$ . La porosité est constante dans le réservoir. L'eau est injectée sur la face amont à flux constant connu. L'huile est à viscosité de 1.

- 5 On commence par chercher l'existence et la forme d'un front stationnaire dans le milieu lorsque la viscosité de l'eau est de 12. Comme on ne dispose pas encore d'a priori, on part d'une interface plane, que l'on déforme de façon itérative jusqu'à atteindre la convergence vers une solution stationnaire (figure 5).

- Une fois la solution obtenue pour cette viscosité, on peut rechercher la solution stationnaire
- 10 pour une viscosité de l'eau inférieure, par exemple une viscosité de 10. La solution stationnaire obtenue précédemment peut servir d'a priori en entrée du processus itératif de déformation du front. On converge alors vers une nouvelle solution. En procédant ainsi itérativement sur différentes valeurs de la viscosité de l'eau, on obtient les formes du front stationnaire associées à ces valeurs (figure 6). Comme le rapport des mobilités entre le fluide
  - 15 ne place et le fluide injecté diminue chaque fois que l'on diminue la viscosité de l'eau, le front s'étale au fur et à mesure, car les effets visqueux ont de plus en plus de mal à compenser les différences de perméabilité d'une strate à l'autre. Lorsque la viscosité de l'eau diminue en deçà de la valeur critique 5, on s'aperçoit que le processus de recherche d'un front stationnaire ne converge plus. Les positions du front dans les deuxième et troisième strates s'éloignent
  - 20 perpétuellement l'un de l'autre. On considère alors qu'un front stationnaire ne peut se former sur toute l'épaisseur du milieu. Ce dernier doit être découpé en deux parties, la séparation se situant entre la deuxième et la troisième couche. On poursuit ensuite le processus de recherche de front stationnaire dans chacune des parties précédemment identifiées.

- En itérant ainsi sur la valeur de la viscosité du fluide injecté, on peut construire un diagramme
- 25 représentant la réponse du milieu du point de vue hydrodynamique en fonction du rapport des mobilités  $M$  entre le fluide en place et le fluide injecté (figure 7). On voit sur ce diagramme que lorsque le rapport des mobilités est supérieur à 5, le milieu se comporte comme une seule couche hydrodynamique, puisqu'un front stationnaire existe sur toute son épaisseur. Lorsque  $M$  passe entre 4,5 et 5 deux couches hydrodynamiques apparaissent : la première est formée
  - 30 des deux premières couches "géologiques", et la seconde des deux autres couches "géologiques". Puis les deux premières couches géologiques se séparent au sens hydrodynamique en deçà d'un rapport  $M$  de 4,5. On a alors trois couches au sens

hydrodynamique dans le milieu. Les deux dernières couches géologiques se séparent en deçà de  $M=3$ . On a alors quatre couches hydrodynamiques, qui correspondent aux quatre couches géologiques présentes dans le milieu.

## REVENDEICATIONS

- 1) Méthode pour déterminer dans un milieu stratifié dont les propriétés physiques sont connues ou estimées, au moins une zone où une interface entre un fluide en place dans le milieu et un fluide de balayage, de viscosités et densités différentes connues, injectés dans le milieu, se déplace de façon stationnaire, dans le but de simplifier la construction d'un modèle de simulation des écoulements dans le milieu, caractérisée en ce que :
- on considère une forme d'interface a priori en supposant que les déplacements de fluides en tous ses points sont stationnaires ;
  - on détermine le champ de pression de part et d'autre de l'interface a priori ; et
  - 10 - on modifie itérativement la forme de l'interface jusqu'à obtenir que les pressions de part et d'autre d'au moins une partie de l'interface s'égalisent en tous points de cette partie ; et
  - on attribue des propriétés hydrodynamiques moyennes uniformément à chaque zone du milieu délimitée par chaque partie d'interface, quand la dite égalisation est atteinte.
- 2) Méthode selon la revendication 1, caractérisée en ce que, à défaut d'obtenir une égalisation des pressions de part et d'autre de l'interface tout le long de celle-ci, on segmente l'interface en plusieurs parties et on modifie itérativement et séparément la forme de ces différentes parties, jusqu'à obtenir une égalisation des pressions de part et d'autre de chacune d'elles, l'étendue de chaque partie d'interface, quand la dite égalisation est atteinte, délimitant une zone favorable à laquelle on attribue uniformément des propriétés hydrodynamiques moyennes.
- 20 3) Méthode selon la revendication 1 ou 2, caractérisée en ce que l'on détermine la forme d'au moins une zone du milieu délimitée par une interface à déplacement stationnaire, qui correspond à des valeurs différentes de la viscosité des fluides de balayage, et on choisit la viscosité pour laquelle on optimise les déplacements stationnaires dans le dit milieu.

1/2

FIG.1

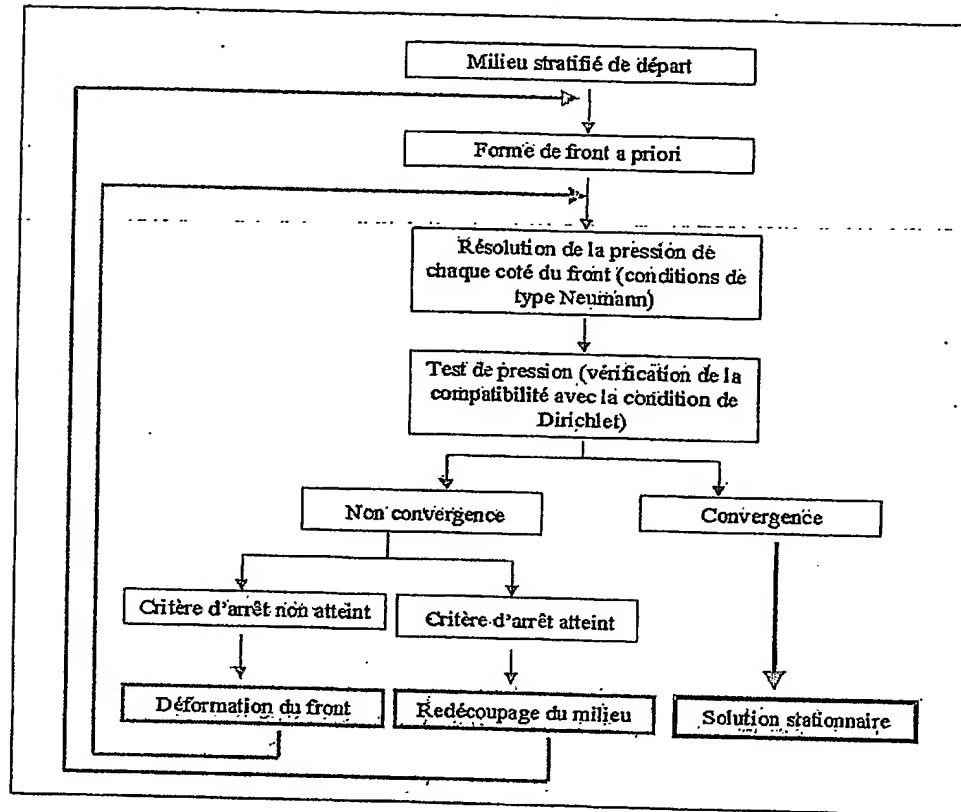


FIG.2

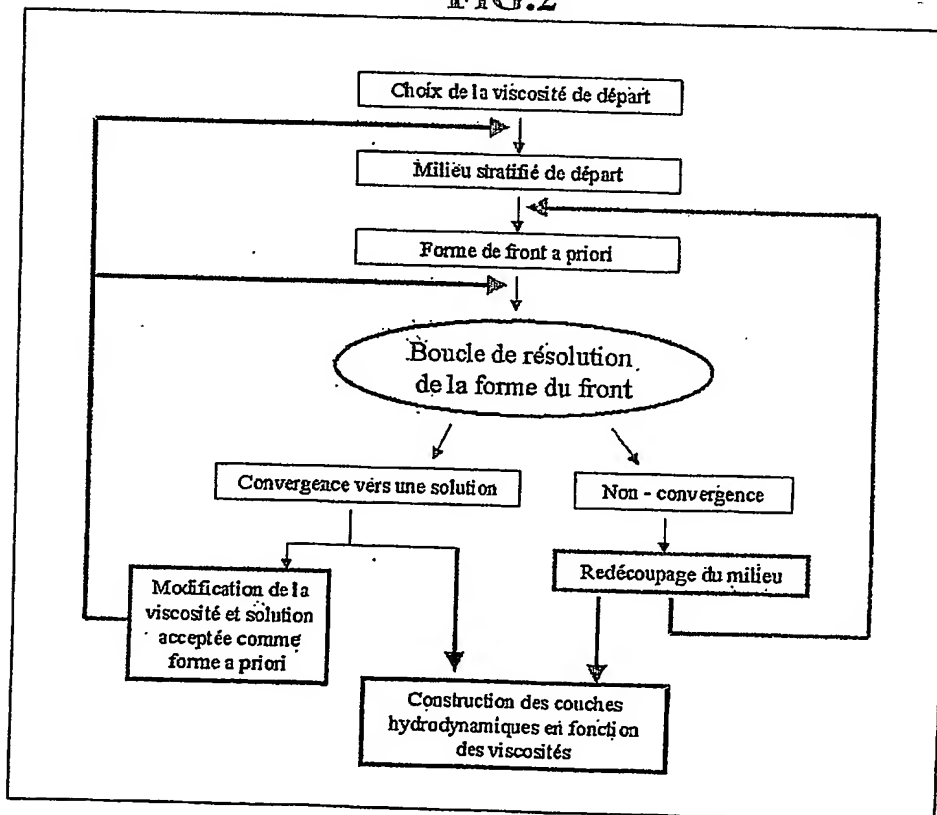


FIG.3

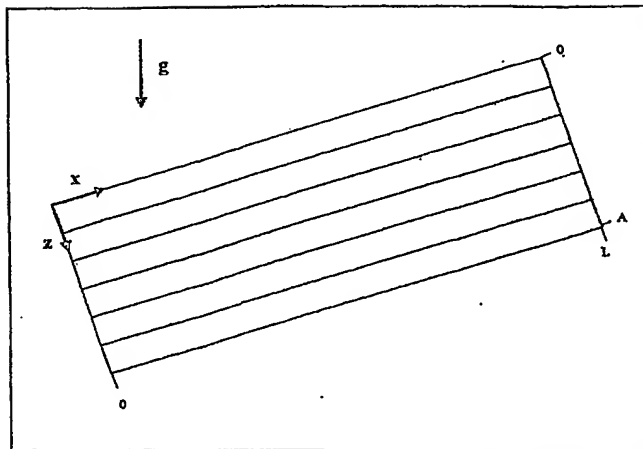


FIG.4

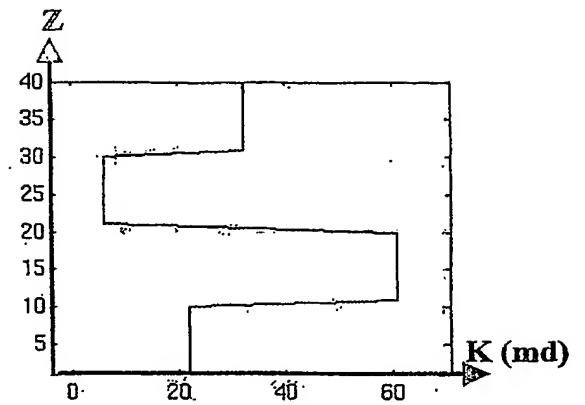


FIG.5

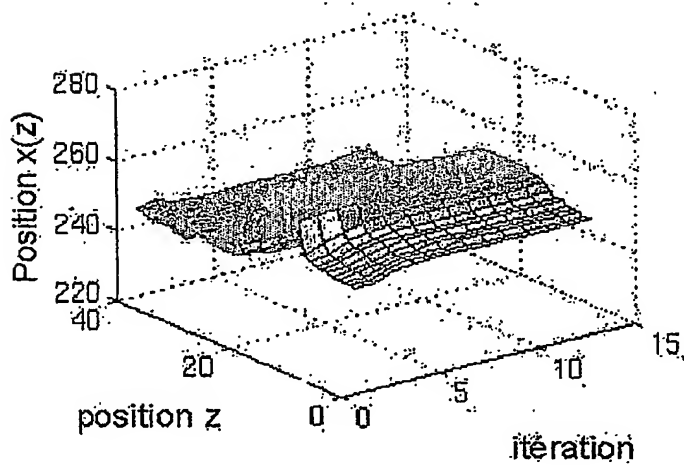


FIG.6

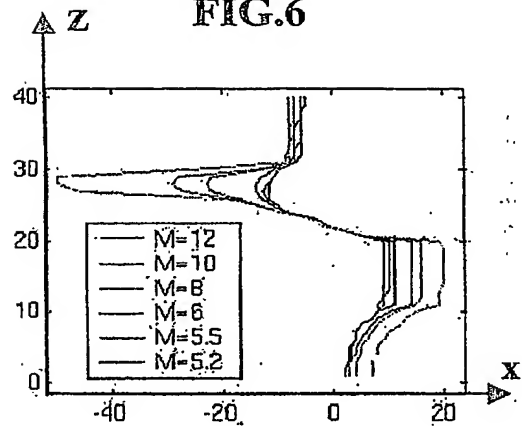
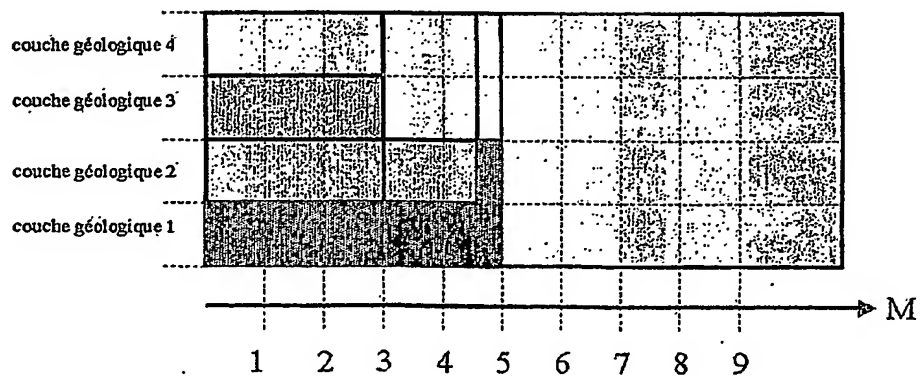


FIG.7



DÉPARTEMENT DES BREVETS

26 bis, rue de Saint Pétersbourg  
75800 Paris Cedex 08

Téléphone : 33 (1) 53 04 53 04 Télécopie : 33 (1) 42 94 86 54

**DÉSIGNATION D'INVENTEUR(S)** Page N° 1../1..

(À fournir dans le cas où les demandeurs et les inventeurs ne sont pas les mêmes personnes)



Cet imprimé est à remplir lisiblement à l'encre noire

DB 113 @ W / 270601

Vos références pour ce dossier (facultatif)		JC/CLN
N° D'ENREGISTREMENT NATIONAL		0300430
TITRE DE L'INVENTION (200 caractères ou espaces maximum)		
METHODE POUR DETERMINER DES ZONES D'UN MILIEU STRATIFIE OU L'INTERFACE ENTRE UN FLUIDE EN PLACE DANS LE MILIEU ET UN FLUIDE DE BALAYAGE, SE DEPLACE DE FAÇON STATIONNAIRE		
LE(S) DEMANDEUR(S) :		
INSTITUT FRANCAIS DU PETROLE		
DESIGNE(NT) EN TANT QU'INVENTEUR(S) :		
<input checked="" type="checkbox"/>	Nom	NOETINGER
	Prénoms	Benoît
Adresse	Rue	290A, avenue Napoléon Bonaparte
	Code postal et ville	92500 Rueil-Malmaison
Société d'appartenance (facultatif)		
<input checked="" type="checkbox"/>	Nom	ARTUS
	Prénoms	Vincent
Adresse	Rue	28, avenue Gabriel Péri
	Code postal et ville	92500 Rueil-Malmaison
Société d'appartenance (facultatif)		
<input type="checkbox"/>	Nom	
	Prénoms	
Adresse	Rue	
	Code postal et ville	
Société d'appartenance (facultatif)		
S'il y a plus de trois inventeurs, utilisez plusieurs formulaires. Indiquez en haut à droite le N° de la page suivi du nombre de pages.		
DATE ET SIGNATURE(S) DU (DES) DEMANDEUR(S) OU DU MANDATAIRE (Nom et qualité du signataire)		
Alfred ELMALEH, Directeur - Propriété Industrielle		

**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☒ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☒ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☒ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER: \_\_\_\_\_**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**